Op-amp als signaalgenerator

Met op-amp's kunt u op een eenvoudige manier schakelingen ontwerpen die de vijf fundamentele spanningsvormen genereren: de rechthoekspanning, de sinusspanning, de driehoekspanning, de zaagtandspanning en de trapspanning.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 17-10-2023

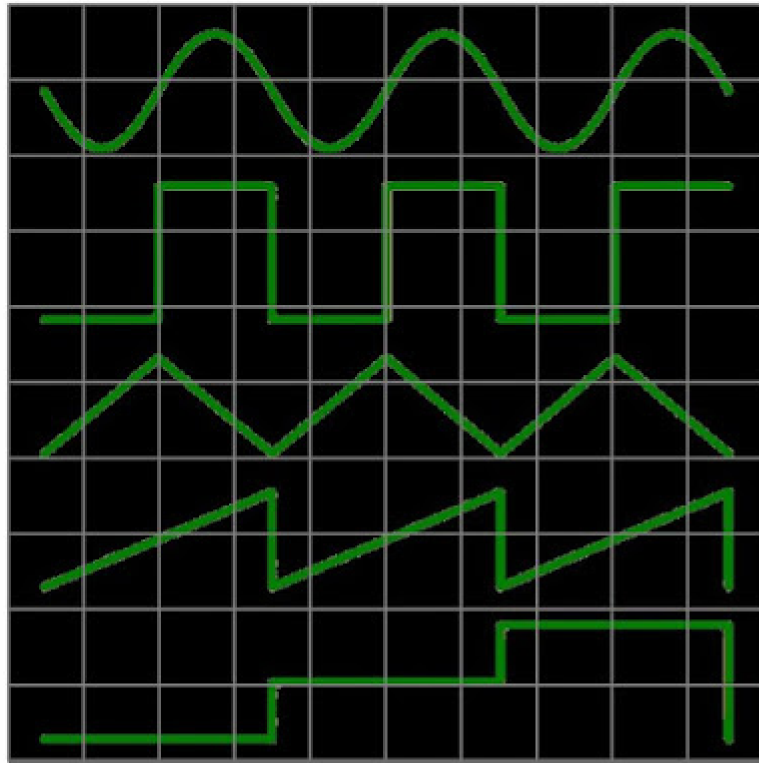
Inleidende begrippen

Signaalgeneratoren
Signaalgeneratoren zijn schakelingen waarmee u een of meerdere elektronische wisselspanningssignalen kunt opwekken. Om in aanmerking te komen voor het predicaat '*signaalgenerator*' moet een schakeling echter aan een aantal eisen voldoen.

- Het gegenereerde signaal moet volledig zelfstandig tot stand komen. Dat wil zeggen dat de schakeling onmiddellijk na het inschakelen van de voedingsspanning moet starten zonder dat daarvoor een of ander extern stuursignaal noodzakelijk is.
- Het gegenereerde signaal moet een periodiek karakter hebben, zich dus regelmatig in de tijd herhalen.
- Het gegenereerde signaal moet gelijkvormig van karakter blijven, iedere periode van het signaal moet er identiek uitzien als de vorige en als de volgende.
- De frequentie en de grootte van het signaal moeten constant zijn en mogen alleen door een bewuste handeling van waarde veranderen.

Signaalvormen
Er bestaan uiteraard in de elektronica ontelbare verschillende signalen die aan de hogergenoemde eisen voldoen. Tóch zijn er maar een paar die als standaard signaal betiteld kunnen worden. Dat zijn:
- De sinusspanning.
- De rechthoekspanning.
- De driehoekspanning.
- De zaagtandspanning.
- De trapspanning.

Met deze vijf basis signaalvormen kan zowat ieder analoog elektronisch probleem opgelost worden. In de volgende hoofdstukken bespreken wij hoe u deze vijf basissignalen met behulp van operationele versterkers kunt genereren.

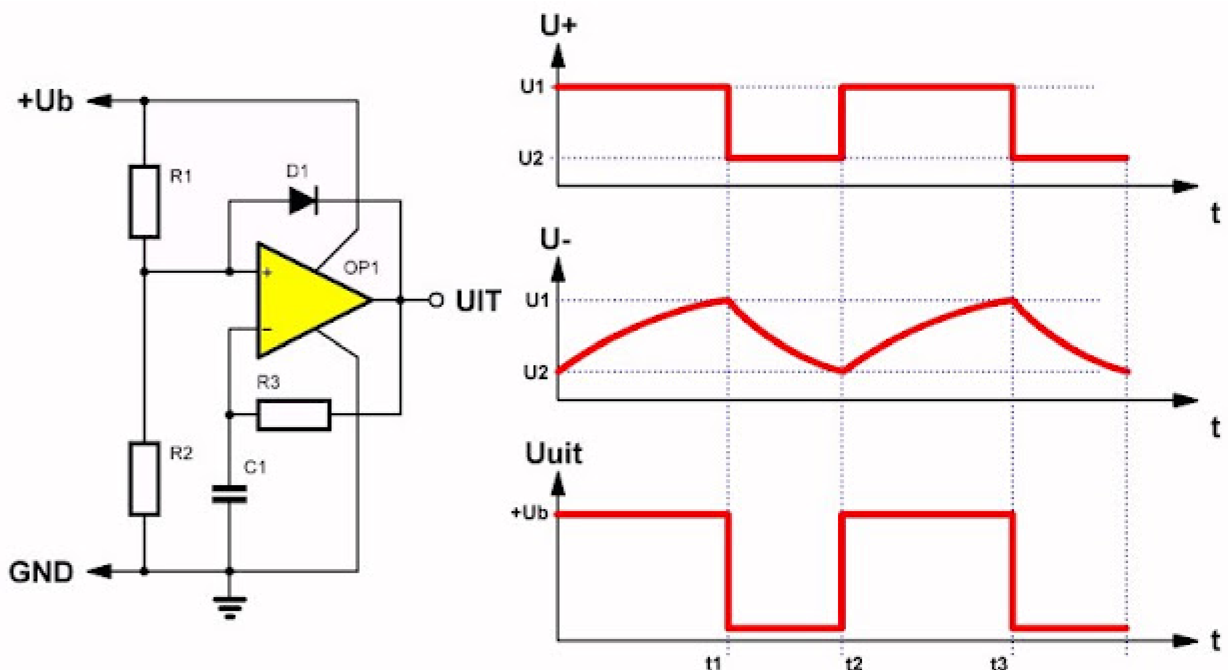


De vijf behandelde signaalvormen. (© 2023 Jos Verstraten)

De rechthoekspanning generator

Inleiding
Een rechthoek is een signaal dat, de naam zegt het al, gedefinieerd wordt door een rechthoekige vorm. Het signaal kent dus maar twee waarden, die in de meeste gevallen 'L' en 'H' worden genoemd worden. Het signaal zal met een bepaalde frequentie zo snel mogelijk van 'L' naar 'H' springen en nadien weer van 'H' naar 'L'.
De rechthoekspanning is een van de meest gebruikte signalen in de elektronica. Niet alleen werkt de volledige digitale elektronica, van eenvoudig flip-flop'je tot de meest uitgebreide computer, alleen maar dank zij het feit dat er rechthoekspanningen bestaan. Maar ook in de analoge elektronica hebt u vaak een rechthoekje nodig, al is het maar voor het aansturen van een andere schakeling, zoals een trapspanning- of zaagtandgenerator.

De basisschakeling met een op-amp
De basisschakeling van een rechthoekspanning generator met een op-amp is getekend in de onderstaande figuur. Let op dat dit schema uitgaat van enkelvoudige positieve voeding +Ub! De niet-inverterende ingang van de op-amp wordt door middel van de twee weerstanden R1 en R2 ingesteld op een spanning U_1. De inverterende ingang is aangesloten op een condensator C1, die naar de massa is geschakeld en houdt bovendien voeling met wat er op de uitgang gebeurt door middel van de terugkoppelweerstand R3. Er is nog een tweede terugkoppeling in de schakeling opgenomen, namelijk de diode D1 die de niet-inverterende ingang onder bepaalde voorwaarden terugkoppelt naar de uitgang.



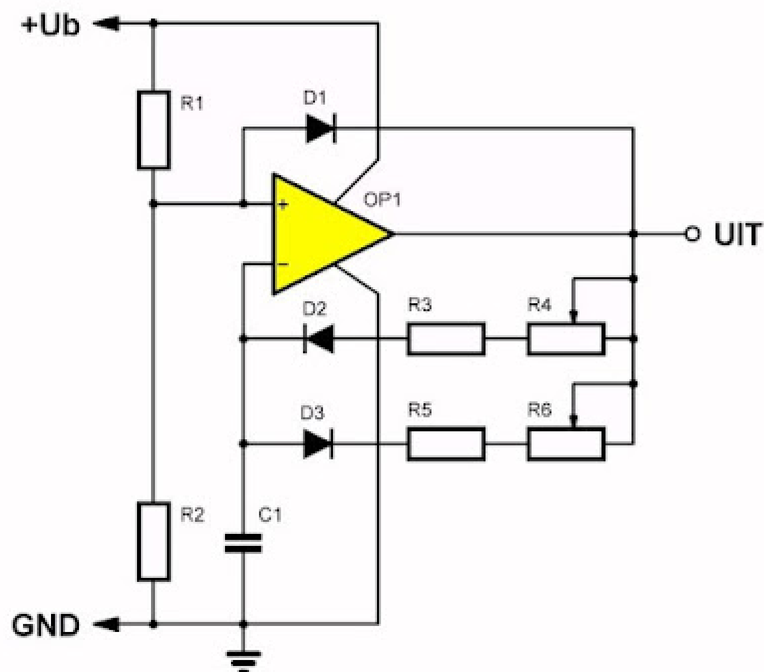
De basisschakeling van een rechthoekspanning generator. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
De werking van de schakeling wordt besproken aan de hand van de grafieken rechts in de figuur. Stel dat de schakeling met de voedingsspanning wordt verbonden. De niet-inverterende ingang van de op-amp stelt zich, dank zij de spanningsdeler R1/R2, in op de spanning U_1. De condensator C1 is volledig ontladen, de spanning op de inverterende ingang is nul. De niet-inverterende ingang is positiever dan de spanning op de inverterende ingang, de uitgang van de op-amp gaat naar de voedingsspanning. De condensator C1 gaat opladen via de weerstand R3 uit deze hoge spanning. De spanning op de inverterende ingang gaat dus langzaam stijgen. De snelheid waarmee deze spanning stijgt wordt bepaald door de waarden van de weerstand R3 en de condensator C1. Op tijdstip t_1 is de condensator geladen tot de spanning U_1. Even later wordt de spanning op de inverterende ingang dus hoger dan de spanning op de niet-inverterende ingang.
Het gevolg is dat de op-amp, die als comparator werkt, omschakelt en de uitgang naar een lage spanning gaat. De diode D1, tot nu toe niet actief, gaat nu geleiden. De kathode wordt immers negatiever dan de anode. De niet-inverterende ingang van de op-amp wordt via de geleidende diode verbonden met de lage uitgangsspanning op de uitgang van de schakeling. Het gevolg is dat de spanning op de niet-inverterende ingang daalt tot een spanning U_2. Deze is gelijk aan de uitgangsspanning van de op-amp plus de geleidingsspanning van de diode D1.
De geladen condensator C1 gaat nu ontladen via de weerstand R3 tot de lage uitgangsspanning van de op-amp. Op tijdstip t_2 wordt de spanning over de condensator gelijk aan de spanning U_2. De inverterende ingang wordt negatiever dan de niet-inverterende ingang, het gevolg is dat de uitgang van de op-amp weer gelijk wordt aan de waarde van de voedingsspanning. De schakeling bevindt zich weer in de uitgangssituatie.

Samengevat
De schakeling wekt op de uitgang een rechthoekvormige spanning op, waarvan de frequentie wordt bepaald door de waarde van de condensator C1 en de weerstand R3.

Instellen van de duty-cycle
De besproken schakeling wekt een rechthoekvormige spanning op, maar de verhouding tussen hoog- en laagtijd is niet instelbaar. Deze '*duty-cycle*' wordt alleen bepaald door de tijdconstante van het laden en ontladen van de condensator C1. Nu zijn deze tijdconstanten weliswaar even groot, maar dat wil nog niet zeggen dat het laden en ontladen even lang duurt. Dat is een gevolg van de verschillende laad- en ontlaadkarakteristieken van een condensator. Het gevolg is dat de uitgang een niet-symmetrische rechthoekspanning opwekt, een spanning waarvan de 'L'-tijd niet gelijk is aan de 'H'-tijd.

Voor vele toepassingen is het echter noodzakelijk dat een rechthoekspanning met een gedefinieerde aan-uit verhouding wordt gegenereerd. De basisschakeling is op een eenvoudige manier uit te breiden tot een systeem waarmee deze aan-uit verhouding instelbaar is.
Hoe dat kan is geschetst in de onderstaande figuur. De condensator C1 wordt nu geladen en ontladen via twee afzonderlijke weerstanden R3+R4 en R5+R6. De dioden D2 en D3 zorgen ervoor dat weerstand R3+R4 wordt gebruikt voor het laden en weerstand R5+R6 voor het ontladen. Als de uitgangsspanning van de op-amp hoog is gaat immers alleen D2 geleiden met als gevolg dat de stroomkring tussen C1 en R3+R4 wordt gesloten. De diode D3 spert en de weerstand R5+R6 is niet actief. Als de uitgangsspanning laag wordt gaat D2 sperren en D3 geleiden. Dan wordt de condensator C1 ontladen via de weerstand R5+R6.
Door beide weerstanden deels onder de vorm van potentiometers uit te voeren kunt u de laad- en ontlaadtijden van de condensator C1 individueel instellen. Op deze manier is het mogelijk een uitgangspuls op te wekken met een instelbare duty-cycle.

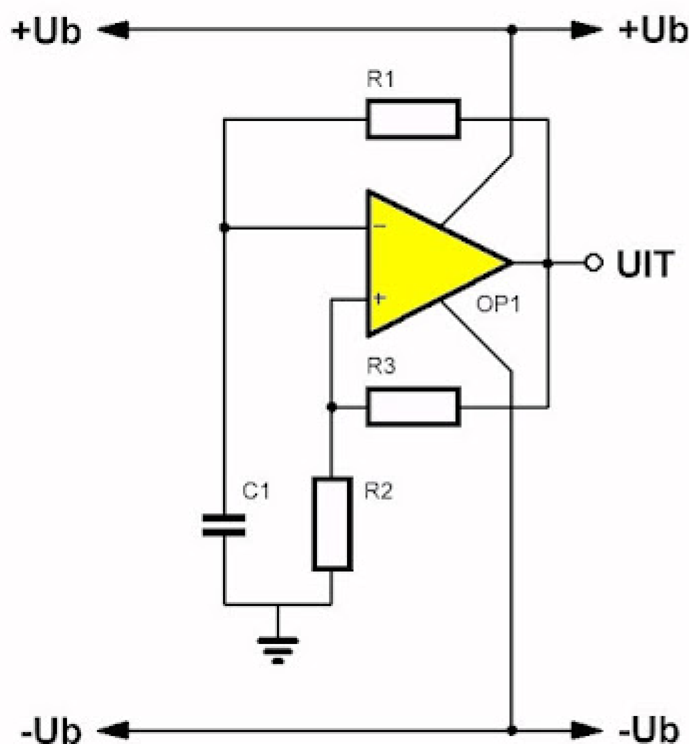


Uitbreiding tot een schakeling met instelbare duty-cycle.
(© 2023 Jos Verstraten)

Voor- en nadelen van de schakeling
De besproken schakeling heeft als voordeel dat zij zeer eenvoudig is en probleemloos werkt. Maar daar staat ook een aantal nadelen tegenover.
De waarde van de frequentie is in niet geringe mate afhankelijk van de grootte van de voedingsspanning. Hoe hoger deze is, hoe sneller de condensator zal opladen. Wilt u een generator ontwerpen met een zeer constante frequentie, dan is het absoluut noodzakelijk de op-amp uit een zeer goed gestabiliseerde voeding te voeden.
Operationele versterkers zijn, dat is algemeen bekend, geen snelheidsmonsters. Iedere op-amp wordt gedefinieerd door een bepaalde slew-rate, uitgedrukt in V/µs. Deze grootheid geeft aan hoe snel de spanning op de uitgang van de op-amp kan stijgen of dalen. Deze grootheid bepaalt dus in deze toepassing hoe snel de rechthoekspanning van 'L' naar 'H' en van 'H' naar 'L' omschakelt. Omdat deze slew-rate bij de meeste operationele versterkers tamelijk laag is moet u niet verwachten dat u deze schakeling kunt gebruiken voor het genereren van een rechthoekspanning met een frequentie van 10 MHz. Voor vele op-amp's is 100 kHz zo ongeveer de grens waarbij u een acceptabele uitgangsspanning kunt verwachten.

Symmetrische voeding
Als u de operationele versterker gebruikt in een systeem met symmetrische voeding kunt u de schakeling nog iets vereenvoudigen. Het theoretische schema is getekend in de

onderstaande figuur. De schakeling rond de inverterende ingang is identiek. De niet-inverterende ingang is nu echter ook opgenomen in een resistieve terugkoppeling tussen de massa en de uitgang.
De werking van de schakeling is als volgt.
Bij het verbinden met de symmetrische voedingsspanningen zal de inverterende ingang op 0 V staan. De condensator C1 is immers ontladen. Afhankelijk van de polariteit van de offsetspanning van de op-amp zal de niet-inverterende ingang iets positiever of iets negatiever zijn dan 0 V. De uitgang van de op-amp loopt dus vast tegen een van de voedingsspanningen. Afhankelijk van de polariteit van de uitgang zal de niet-inverterende ingang zich instellen op een positieve of negatieve referentiespanning. De waarde van deze spanning wordt bepaald door de verhouding tussen R2 en R3.
De condensator C1 zal zich, alweer afhankelijk van de polariteit van de uitgang, positief opladen of negatief ontladen. Wat ook het geval zij, na enige tijd wordt de spanning op de inverterende ingang groter of kleiner dan de spanning op de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de uitgang van de op-amp omklapt van + naar - of van - naar + en dat de condensator in de tegengestelde zin wordt geladen of ontladen.
Ook nu wordt de frequentie van het uitgangssignaal alleen bepaald door de waarden van de passieve onderdelen rond de op-amp en door de waarde van de voedingsspanning. De uitgang levert een niet symmetrische rechthoekspanning af, die heen en weer springt tussen een negatieve 'L' en een positieve 'H'.
Nadeel van deze schakeling is dat de spanning over de condensator zowel negatief als positief zal worden. Het is dus niet mogelijk een elco toe te passen.
Ook nu kunt u het reeds besproken principe toepassen voor het regelen van de aan-uit verhouding van de uitgangspuls.



Het schema met symmetrische voeding.
(© 2023 Jos Verstraten)

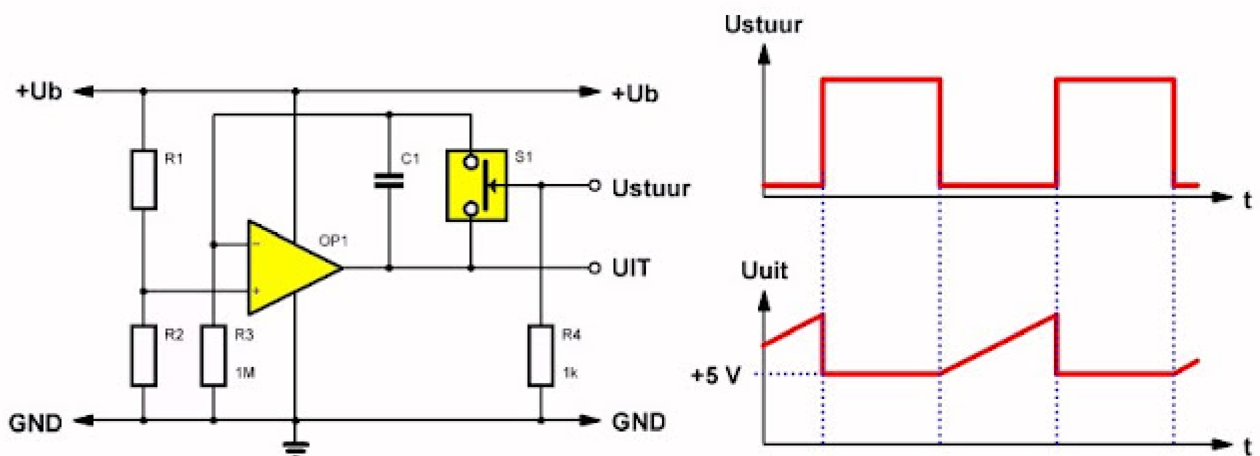
De zaagtandspanning generator

Inleiding

Een zaagtand is een signaal dat wordt gedefinieerd door een constante spanningsstijging of -daling in functie van de tijd. Nadat de spanning tot een bepaalde waarde gestegen of gedaald

is zal deze zo snel mogelijk terug vallen naar het uitgangsniveau.

De basisschakeling
De basisschakeling van een zaagtandspanning generator met een operationele versterker is getekend in de onderstaande figuur. De niet-inverterende ingang van de op-amp wordt ingesteld op de helft van de voedingsspanning door middel van de even grote weerstanden R1 en R2. Stel dat de schakeling wordt gevoed uit +10 V. Dan zal de niet-inverterende ingang dus op +5 V staan. De schakeling zal ernaar streven beide ingangen op dezelfde spanning in te stellen. Het gevolg is dat ook de inverterende ingang op +5 V wil staan. Dat kan alleen als er door de weerstand R3 een bepaalde stroom gaat vloeien. Met de gegeven waarde van 1 MΩ zal deze stroom gelijk zijn aan 5 µA.
De inverterende ingang heeft een zeer hoge ingangsweerstand. De stroom die door de weerstand R3 vloeit kan niet via deze ingang verder vloeien. Er is maar één stroomweg open en dat is via de condensator C1. Deze condensator wordt dus doorlopen door een constante stroom van 5 µA. Als een condensator wordt doorlopen door een constante stroom zal de spanning over de condensator lineair stijgen. Maar omdat de bovenste aansluiting van de condensator door het systeem op een constante spanning van +5 V wordt gehouden, is het gevolg dat de spanning op de onderste aansluiting lineair gaat stijgen. Op de uitgang van de operationele versterker ontstaat een lineair stijgende spanning, het fundamentele kenmerk van een zaagtandspanning.
Natuurlijk kan dit proces niet blijven duren. Na een bepaalde tijd zou immers de spanning op de uitgang groter worden dan de voedingsspanning en dat is onmogelijk.
Vandaar dat de condensator C1 overbrugd is met een elektronische schakelaar S1 uit een CD4066B CMOS-IC. Deze schakelaar wordt gestuurd uit een externe spanning U_{stuur}, waarvoor een rechthoekspanning heel bruikbaar is. Als deze positief is zal de schakelaar sluiten. De condensator C1 wordt nu heel snel ontladen via de zeer lage inwendige weerstand van de gesloten schakelaar. Het gevolg is dat de spanning op de uitgang van de condensator daalt naar +5 V, de spanning op beide ingangen.

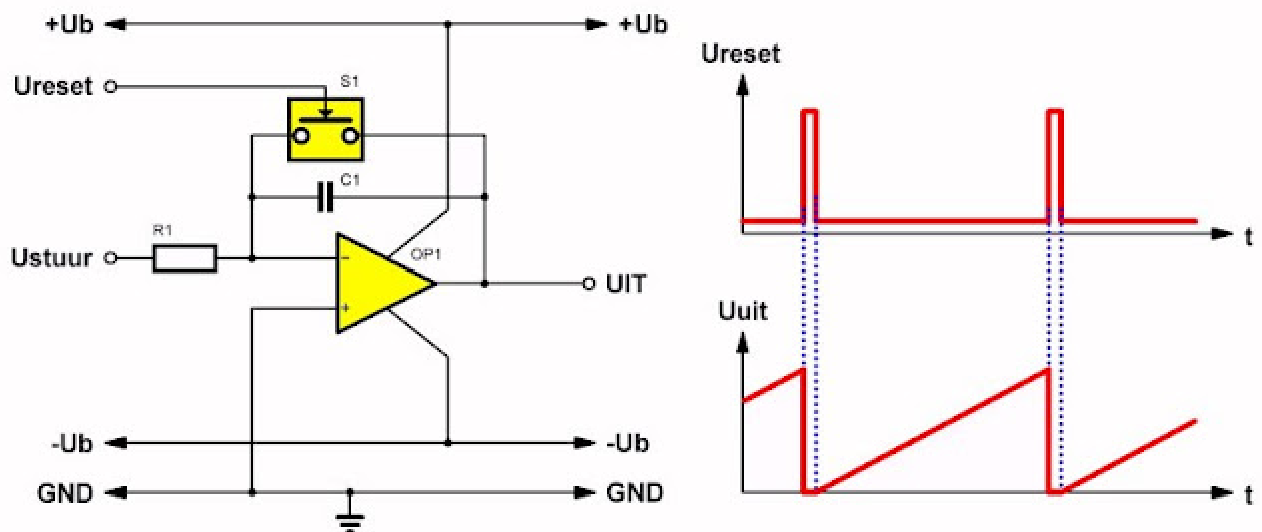


Het basisschema van een zaagtandspanning generator. (© 2023 Jos Verstraten)

Besluit
Deze schakeling levert een zaagtandspanning die stijgt van de instelspanning van +5 V tot een bepaalde hogere waarde. De frequentie van het uitgangssignaal is afhankelijk van de frequentie van het signaal waarmee u de elektronische schakelaar stuurt.

Alternatieve schakeling met symmetrische voeding
De niet-inverterende ingang is met de massa verbonden, het gevolg is dat de schakeling de spanning op de inverterende ingang ook op 0 V zal instellen. De inverterende ingang is via een weerstand R1 verbonden met een externe stuurspanning U_{stuur}. Het gevolg is dat door de weerstand R1 een stroom naar de inverterende ingang zal vloeien. De grootte van deze stroom is afhankelijk van de waarde van de weerstand en van de grootte van de stuurspanning. Ook nu kan deze stroom niet verder vloeien naar de inverterende ingang. De enige stroomweg die open blijft is via de condensator C1. Deze wordt doorlopen door een

constante stroom, de spanning over het onderdeel zal lineair stijgen of dalen.



Een zaagtandgenerator met symmetrische voeding. (© 2023 Jos Verstraten)

Het stijgende of dalende karakter van de condensatorspanning is afhankelijk van de polariteit van de stuurspanning. Ook nu wordt de condensator weer ontladen door het sluiten van een elektronische schakelaar, die over de condensator is geschakeld, met de puls U_{reset}.
Het zal duidelijk zijn dat u alle eigenschappen van de gegenereerde zaagtand volledig in de hand hebt! De polariteit van deze zaagtand is immers afhankelijk van de polariteit van de stuurspanning. De snelheid waarmee de zaagtandspanning daalt of stijgt is afhankelijk van de grootte van de stuurspanning. De aan/uit-verhouding van de zaagtand is afhankelijk van de aan/uit-verhouding van de rechthoekspanning waarmee u de elektronische schakelaar stuurt. Als u deze schakelaar met een naaldvormige positieve rechthoekspanning stuurt, zoals in het onderstaande voorbeeld, zal de condensator ontladen worden door deze smalle positieve puls en onmiddellijk nadien zal er een nieuwe periode van de zaagtand worden opgebouwd.

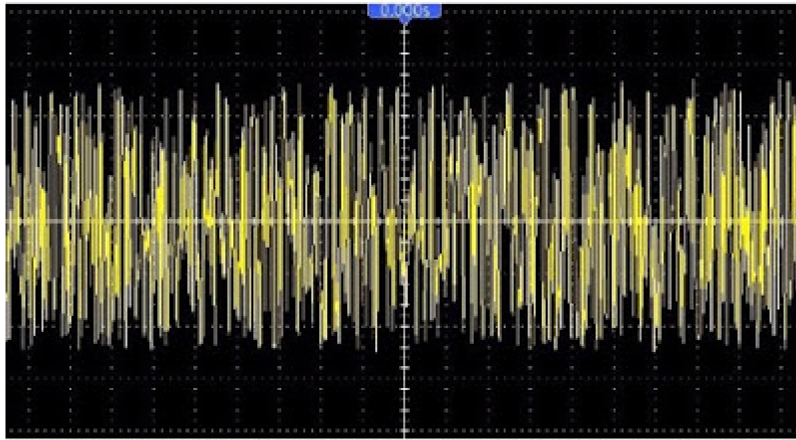
De sinusspanning generator

Inleiding
De sinusspanning is een van de belangrijkste signaalvormen uit de elektronica. De volledige audio- en videotechniek heeft tot taak sinusoidale spanningen of combinaties daarvan zo natuurgetrouw mogelijk te versterker. Het zal dus duidelijk zijn dat schakelingen die sinusvormige spanningen kunnen genereren zeer gewild zijn.

Achtergronden
Als u de werking van een sinusgenerator wilt doorgronden is het noodzakelijk eerst wat algemene begrippen uit de elektronica te verklaren.

Ruis
Het eerste begrip dat aan de orde komt is '*ruis*'. Ruis is een ongewenste stoorspanning die in iedere elektronische schakeling wordt opgewekt. Er bestaan verschillende soorten ruis, maar de meest voorkomende is de '*thermische ruis*'. Onder invloed van de temperatuur van onderdelen gaan vrije elektronen van het ene naar het andere atoom springen. Deze elektronenbeweging veroorzaakt een zeer klein stroompje en dit stroompje wekt een ruisspanning op over de onderdelen. Ruis is dus een volstrekt statistisch verschijnsel. Het moment waarop een vrij elektron besluit van het ene naar het andere atoom te migreren is niet te voorspellen. Het gevolg is dat ruis is samengesteld uit signaaltjes met zeer uiteenlopende frequenties. Als u een ruissignaal zou analyseren naar frequentie-inhoud, dan zou u vaststellen dat zowat alle mogelijke frequenties aanwezig zijn. In het onderstaande

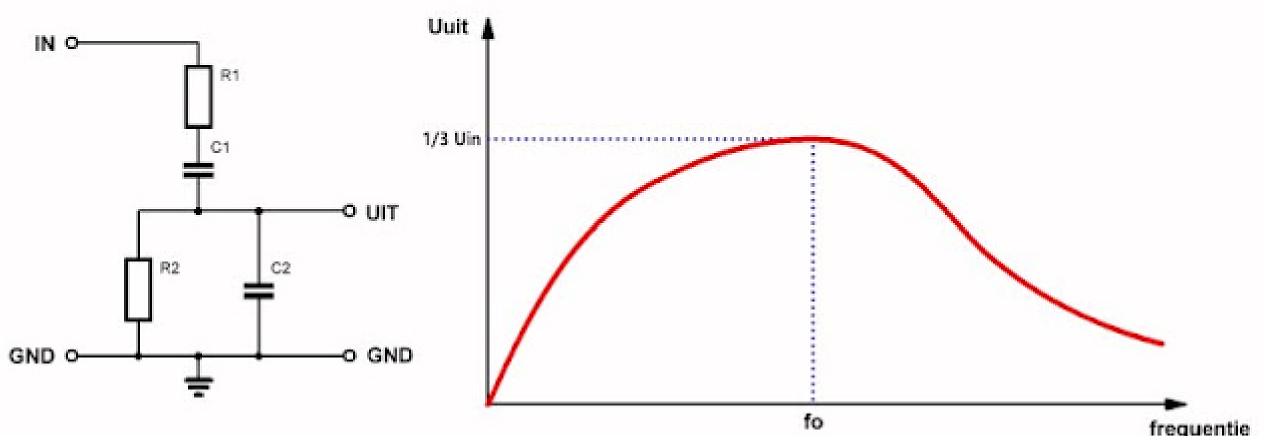
oscillogram ziet u het typisch verloop van een ruissignaal.



Een ruissignaal op de oscilloscoop. (© 2023 Jos Verstraten)

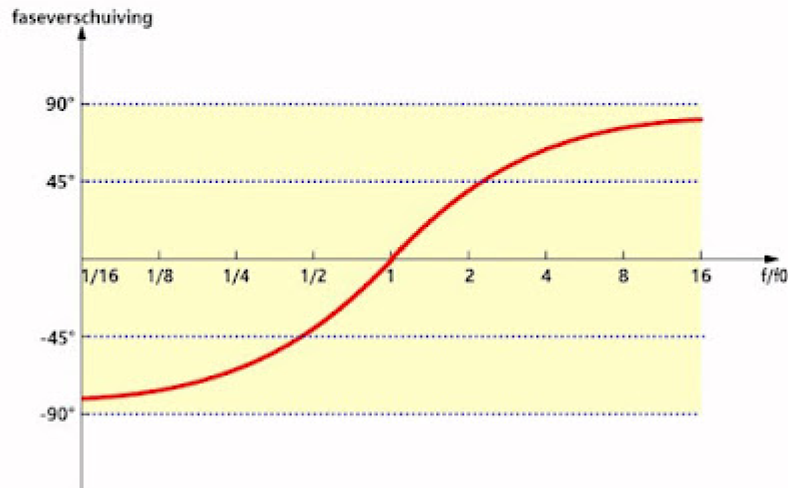
Afgestemd filter

Een tweede fundamenteel principe dat verklaard moet worden is dat van het afgestemd filter. Een afgestemd filter is een schakeling die signalen met één bepaalde frequentie maximaal doorlaat of verzwakt en signalen met afwijkende frequenties verzwakt of net wél doorlaat. Er bestaan ontelbare schakelingen van afgestemde filters. Sinusgeneratoren zijn vrijwel steeds opgebouwd rond een afgestemd filter dat door het leven gaat onder de naam '*brug van Wien*'. De typische samenstelling van een dergelijk afgestemd filter is weergegeven in de onderstaande figuur. De ingang wordt via een weerstand R1 en een condensator C1 verbonden met de uitgang. Tussen de uitgang en de massa staat de parallelschakeling van een weerstand R2 en een condensator C2. In de meeste gevallen is R1 = R2 en Cl = C2, maar een absolute voorwaarde is dat niet.
Als u aan de ingang van het filter een sinussignaal met een variabele frequentie legt en u meet hoeveel van dit signaal op de uitgang terug is te vinden is, dan ontstaat het typisch plaatje dat rechts in de figuur is geschetst. Voor zeer lage frequenties zult u niets op de uitgang terugvinden. Dat is vrij logisch, want de seriecondensator C1 heeft voor deze lage frequenties een zeer hoge weerstand. Als de frequentie van het ingangssignaal stijgt zult u steeds meer uitgangssignaal meten. Er is een bepaalde frequentie f_o, waarbij het uitgangssignaal maximaal is. Laat u de frequentie van het ingangssignaal verder toenemen, dan blijkt dat er op de uitgang weer minder signaal terug is te vinden. Ook dat is logisch, want naarmate de frequentie van het signaal stijgt zal de condensator C2 een steeds lagere weerstand krijgen en steeds meer van het signaal kortsluiten naar de massa.
De frequentie f_o noemt men de eigen frequentie van het filter. Bij deze frequentie zal de brug van Wien precies drie maal verzwakken. De uitgangsspanning is dus gelijk aan 1/3 van de ingangsspanning.



Het afgestemde filter dat bekend staat onder de naam 'brug van Wien'. (© 2023 Jos Verstraten)

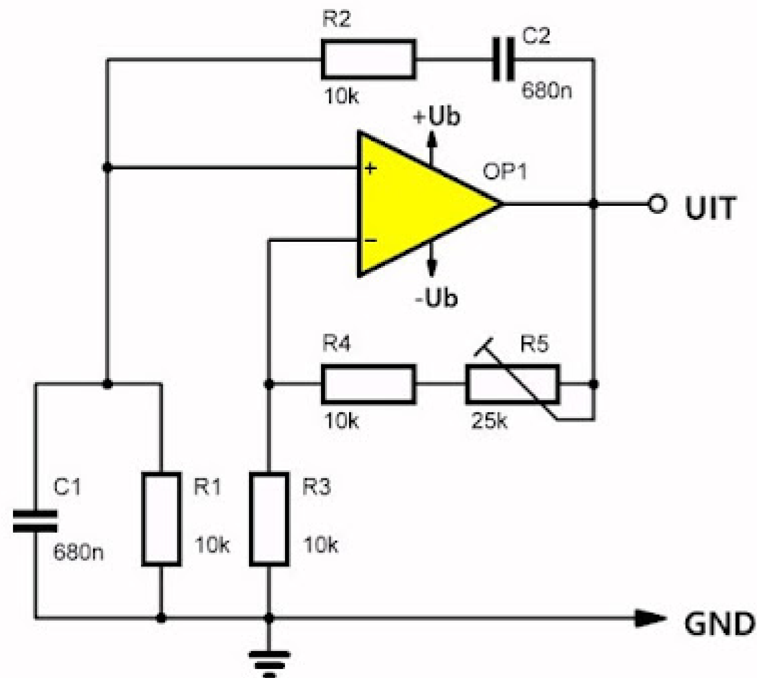
De faseverschuiving van de brug van Wien
Er is nog een tweede belangrijke eigenschap van de brug van Wien die niet onvermeld mag blijven. Meet u namelijk de faseverschuiving tussen de in- en de uitgangsspanning, dan zult u vaststellen dat bij de eigen frequentie f_0 deze faseverschuiving precies 0° bedraagt. Dit verschijnsel wordt grafisch voorgesteld in de onderstaande grafiek. Voor alle andere signaalfrequenties bestaat er een positief of negatief faseverschil tussen het in- en uitgangssignaal.



De faseverschuiving van de brug van Wien.
(© 2023 Jos Verstraten)

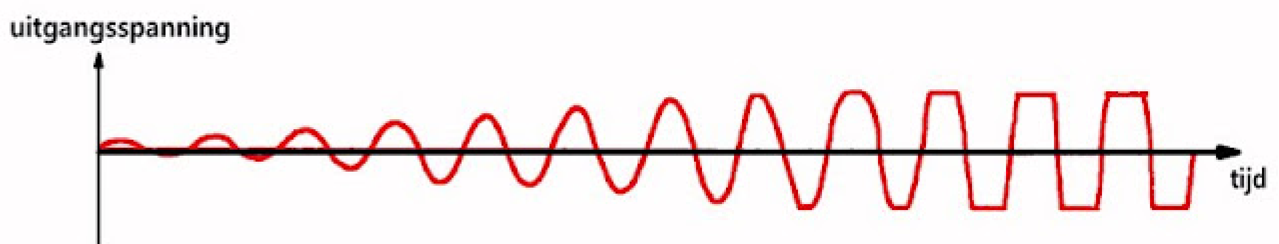
Ruis als ingang van de brug van Wien
Sluit u op de ingang van het filter een ruissignaal aan, dan zal de signaalcomponent in de ruis met een frequentie gelijk aan f_0 dus minder verzwakt op de uitgang verschijnen dan alle andere ruiscomponenten. Bovendien zal dat het enige signaal uit de ruis zijn, waarbij geen faseverschuiving optreedt.

De fundamentele sinusgenerator
Het fundamentele schema van een sinusgenerator met een op-amp is getekend in de onderstaande figuur. Opgemerkt moet worden dat deze schakeling nog niet werkt! Maar de bespreking van dit schema is een noodzakelijke stap naar de uiteindelijke sinusschakeling.
De niet-inverterende ingang van de operationele versterker is opgenomen in een brug van Wien. Deze is geschakeld tussen de uitgang en de massa. De uitgang van de op-amp is dus de ingang van de brug van Wien, de niet-inverterende ingang de uitgang.
De inverterende ingang van de op-amp is opgenomen in een resistieve terugkoppeling. De weerstanden R3, R4 en R5 zorgen ervoor dat de schakeling een bepaalde versterkingsfactor heeft. De waarde van de versterkingsfactor is instelbaar door het verdraaien van de loper van de instelpotentiometer R5. Stel dat u de weerstand op minimale waarde draait. Op dat moment wordt de versterking van de op-amp bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R3 en R4.
Stel nu dat u de schakeling met de symmetrische voedingspanningen verbindt en dat u een oscilloscoop op de uitgang aansluit.



De fundamentele schakeling van een sinusgenerator.
(© 2023 Jos Verstraten)

Er zal niets gebeuren, de uitgang van de schakeling blijft op 0 V staan. Vervolgens verdraait u zeer langzaam de loper van R5, zodat de versterkingsfactor van de op-amp langzaam stijgt. Op een bepaald moment zult u merken dat op de uitgang van de schakeling zeer kleine sinusoidale oscillaties ontstaan. Op dat moment mag u de loper van de potentiometer R5 niet meer verdraaien.
Wat er vervolgens gebeurt is geschetst in de onderstaande figuur. De amplitude van de uitgangsspanning zal langzaam stijgen en in eerste instantie zal het signaal sinusvormig verlopen. Na een bepaalde tijd wordt echter de amplitude zo groot dat het uitgangssignaal van de op-amp vastloopt tegen de voedingsspanningen. De sinus gaat eerst vervormen en na enige tijd is deze vervorming zo groot geworden dat het uitgangssignaal lijkt op een rechthoekvormige spanning. Dat is de stabiele toestand van de schakeling.



Het spanningsverloop op de uitgang van de schakeling. (© 2023 Jos Verstraten)

Verklaring van de werking
Het is van het grootste belang dat u het eigenaardige gedrag van de schakeling begrijpt. Wat gebeurt er? Bij het inschakelen van de voeding zal er in alle weerstanden een ruisspanning worden geïntroduceerd. Deze ruisspanningen verschijnen uiteraard ook op de uitgang van de operationele versterker. Deze worden teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang via de brug van Wien. Dit filter zal ervoor zorgen dat de ruissignalen met frequentie gelijk aan f_0 het minst verzwakt worden teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang. Bovendien verschijnen alleen deze signalen in fase op de uitgang van het filter. Maar het Wien-netwerk verzwakt ook deze signalen drie maal. Omdat de versterking van de op-amp op dit moment kleiner is dan drie zal het signaal met frequentie f_0 weliswaar versterkt aan de uitgang verschijnen, maar te weinig versterkt om de verzwakking van het Wien-filter te elimineren. De schakeling blijft in rust.

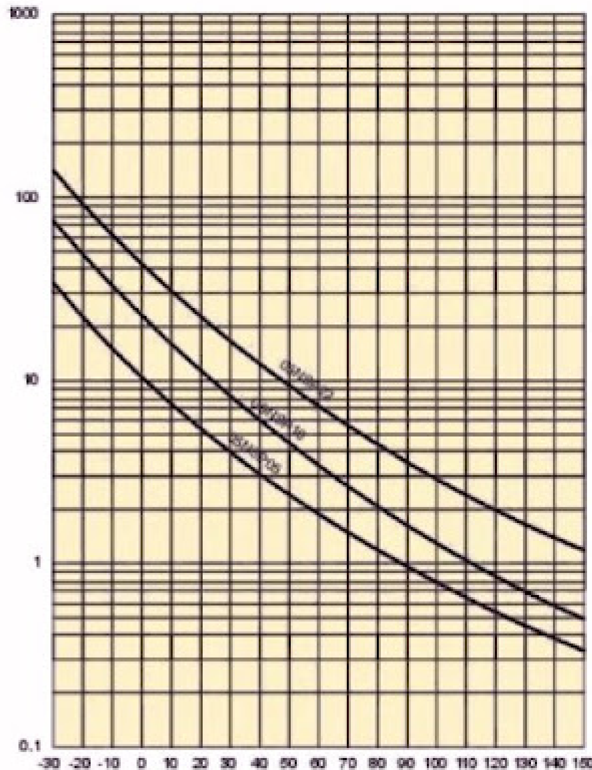
Als u echter, door het verdraaien van de loper van R5, de versterking van de schakeling opvoert tot exact drie, dan zal het teruggekoppelde en met een factor drie verzwakte signaal met een frequentie f_o nadien drie maal door de op-amp worden versterkt. Dit signaal wordt weer teruggekoppeld, verschijnt drie maal verzwakt maar in fase op de niet-inverterende ingang en wordt nadien weer eens drie maal versterkt door de op-amp.
Het gevolg is dat alleen dit ene signaal in de schakeling kan blijven circuleren en dat de schakeling in principe een mooie, onvervormde sinus met een frequentie gelijk aan f_o op de uitgang zou aanbieden. Maar de gehele werking van de schakeling hangt af van het exact compenseren van de verzwakking van de brug van Wien door de op-amp. Als de versterking van de op-amp iets kleiner wordt dan drie zal het signaal weer uitsterven. Als de versterking iets groter wordt dan drie zal het signaal vastlopen tegen de voedingsspanningen en een rechthoek worden.

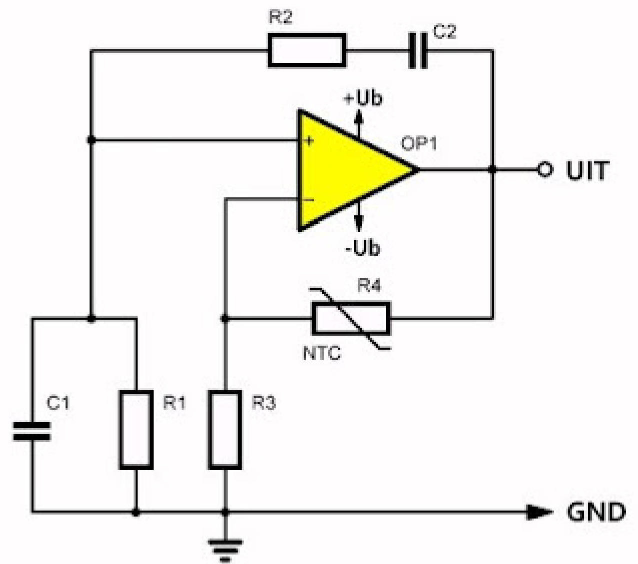
De automatische versterkingsregeling AVR
De enige mogelijkheid om de beschreven schakeling om te vormen tot een praktisch bruikbare sinusgenerator is het introduceren van een **A**utomatische **V**ersterkings**R**egeling (AVR) die ervoor zorgt dat de versterking zich automatisch aanpast aan de verzwakking van het filter. Of met andere woorden, er moet een schakeling worden geïntroduceerd die de versterking van de operationele versterker automatisch zó instelt, dat de amplitude van de uitgangsspanning constant blijft.
Voor deze absoluut noodzakelijke automatische versterkingsregeling zijn in de loop der jaren ontelbare systemen en principes ontwikkeld. Sommigen zijn zeer eenvoudig, anderen bevatten veel meer componenten dan de eigenlijke sinusgenerator zélf. Dat is niet ten onrechte, want de kwaliteit van een sinusgenerator wordt volledig bepaald door de eigenschappen van de automatische versterkingsregeling.

Invloed op de vervorming op de sinus
Het probleem is dat deze schakeling een niet-lineaire terugkoppeling in de schakeling introduceert. De specificaties van deze terugkoppeling bepalen onder andere de vervorming die op de sinus op de uitgang ontstaat. Er bestaan sinusgeneratoren met een vervorming van 1,0 % en met een vervorming van 0,01 %. Deze waarde wordt in eerste instantie bepaald door de nauwkeurigheid van de onderdelen in de brug van Wien, maar in tweede bijna even belangrijke instantie door de kwaliteit van de automatische versterkingsregeling.
In de volgende paragraafjes worden enige vaak toegepaste systemen onder het vergrootglas gelegd.

Een thermistor als terugkoppel-element
Een thermistor, NTC of weerstand met negatieve temperatuurscoëfficiënt is een weerstand waarvan de weerstand daalt naarmate de weerstand warmer wordt. De karakteristieken van enige thermistors zijn getekend in de onderstaande figuur. U ziet op de horizontale as de temperatuur en op de verticale as de weerstand van de NTC.
Een dergelijke thermistor kunt u volgens het rechter schema gebruiken om de versterking van een sinusgenerator automatisch te stabiliseren. De thermistor is opgenomen in het versterkingsbepalende terugkoppelnetwerk van de uitgang naar de inverterende ingang. Als u de schakeling met de voeding verbindt zal de thermistor koud zijn en zal zijn weerstand vrij hoog zijn. De versterkingsfactor van de op-amp wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstand van de thermistor en de waarde van de weerstand R3. Deze verhouding is groot en de schakeling zal in ieder geval meer dan drie maal versterken. De op-amp compenseert de verzwakking van het Wien-netwerk en de schakeling gaat oscilleren. De uitgangsspanning is in eerste instantie vrij groot, de kans is zelfs aanwezig dat de uitgangsspanning volledig vastloopt tegen de voedingsspanningen. Deze grote uitgangsspanning stuurt een stroom door de thermistor waardoor deze iets gaat opwarmen en zijn weerstand afneemt.
Het gevolg is dat de versterkíngsfactor van de op-amp ook gaat dalen. De kunst is nu een geschikte thermistor te vinden en deze te combineren met een juiste waarde voor de weerstand R3. Alleen dan zal de schakeling zich stabiliseren in een toestand waarin een stabiele en tamelijk vervormingsvrije sinus op de uitgang ontstaat.
Het nadeel van deze schakeling is dat de omgevingstemperatuur een grote invloed heeft op de werking van de schakeling. Vandaar dat u een thermistor-gestabiliseerde sinusgenerator

alleen zult aantreffen op plaatsen waar er geen al te hoge eisen worden gesteld aan de kwaliteit van de sinus.

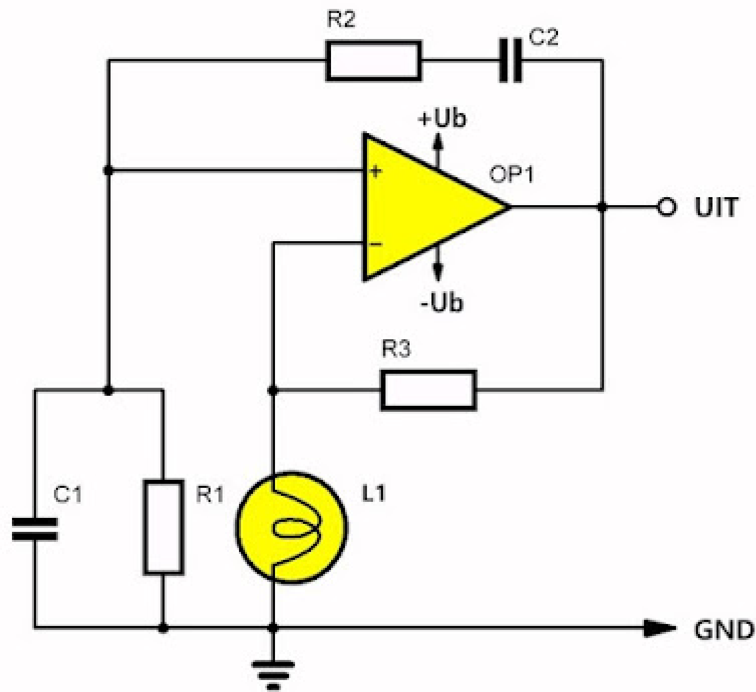




Een thermistor gebruikt voor het instellen van de versterking. (© 2023 Jos Verstraten)

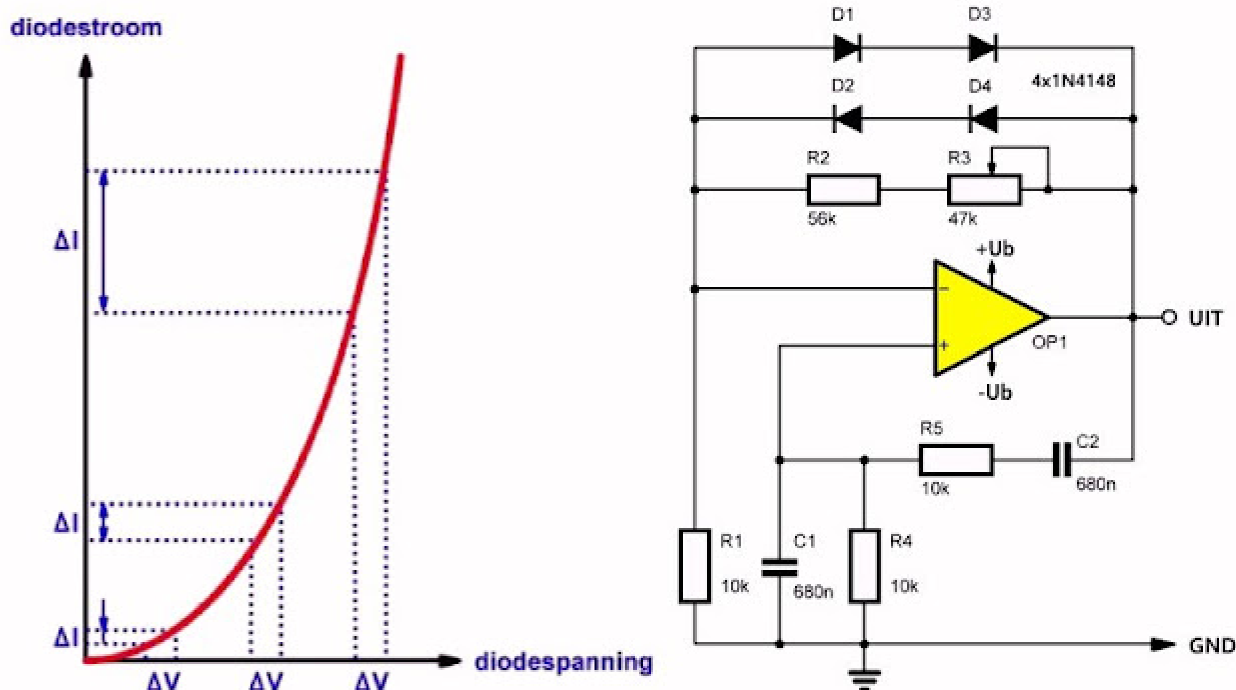
Een gloeilampje als terugkoppel-element

Een gloeilamp is in feite een PTC of weerstand met positieve temperatuurscoëfficiënt. In koude toestand heeft de gloeidraad van een lampje een kleine weerstand en deze weerstand stijgt naarmate de gloeidraad opwarmt. Dankzij deze eigenschap is het mogelijk een sinusgenerator te stabiliseren door een klein gloeilampje in de terugkoppeling op te nemen. Het basisschema is getekend in de onderstaande figuur. Het lampje L1 is geschakeld tussen de inverterende ingang van de op-amp en de massa. In koude toestand is de weerstand van L1 laag. De versterking van de op-amp wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstand van dit lampje en de waarde van de weerstand R3. Deze verhouding is groot, de op-amp versterkt veel meer dan drie en de schakeling gaat oscilleren. De grote uitgangsspanning stuurt een stroom door R3 en L1 met als gevolg dat de gloeidraad opwarmt en de weerstand stijgt. De versterkingsfactor neemt af en ook nu is het weer de kunst L1 en R3 zo te selecteren dat de schakeling zich stabiliseert op een versterkingsfactor van drie.



Een gloeilampje als AVR in een sinusgenerator.
(© 2023 Jos Verstraten)

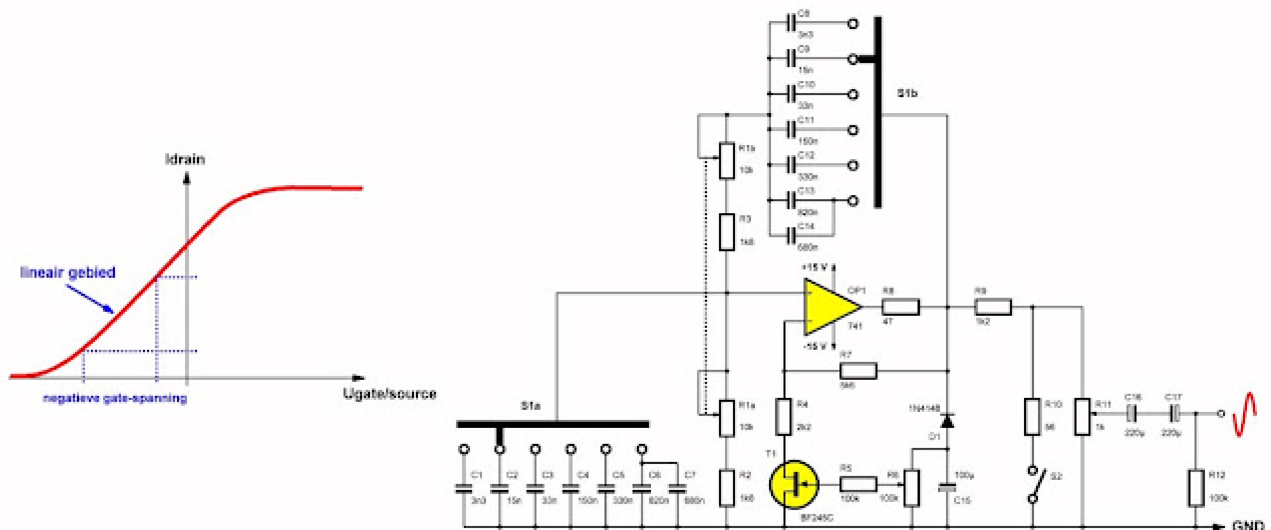
Silicium diodes als terugkoppel-element
Een silicium diode heeft een stroom/spanning-karakteristiek die links is getekend is in onderstaande figuur. Als de spanning over de diode laag is, dan is ook de stroom zeer klein. Naarmate de spanning stijgt zal de stroom echter meer dan lineair stijgen. Uit de stroom/spanning-karakteristiek van een onderdeel kunt u de waarde van de inwendige weerstand afleiden. Dat is in de grafiek op drie verschillende plaatsen gedaan. Voor drie even grote spanningsvariaties ΔU wordt de overeenkomende stroomvariatie ΔI uitgezet. Hieruit blijkt dat ΔI_1 veel kleiner is dan ΔI_3. Het logische gevolg is dat de inwendige weerstand van de diode bij de laagste ΔU veel groter is dan bij de hoogste ΔU. De stroomvariatie bij gelijk blijvende spanningsvariatie wordt immers volledig bepaald door de weerstand!
U kunt dus besluiten dat de inwendige weerstand van een siliciumdiode niet constant is, maar afneemt naarmate er meer spanning over de diode staat. Het zal dus duidelijk zijn dat u een dergelijk onderdeel kunt gebruiken voor het stabiliseren van de versterking van een sinusgenerator.
Het basisschema is rechts getekend in onderstaande figuur. Vier anti-parallel geschakelde diodes D1 tot en met D4 zijn opgenomen in de terugkoppellus van de operationele versterker. Bij het inschakelen van de voeding staat er geen spanning over de diodes. Deze hebben een zeer hoge weerstand. De versterkingsfactor van de operationele versterker is zeer groot, de schakeling gaat onmiddellijk oscilleren. Naarmate de uitgangsspanning stijgt komt er meer spanning over de diodes te staan. Hun inwendige weerstand daalt en dus ook de versterking van de op-amp. Ook nu is het uw ontwerperskunst die er voor moet zorgen R1, R2 en R3 zó te dimensioneren dat de schakeling zich uiteindelijk stabiliseert op een versterkingsfactor van drie. Met de potentiometer R3 kunt u de schakeling afregelen op een mooie sinus op de uitgang.



Vier silicium diodes als AVR in een sinusgenerator. (© 2023 Jos Verstraten)

Een FET als terugkoppel-element
Als laatste voorbeeld van een bruikbaar terugkoppel-element wordt de FET behandeld. Een FET is een transistor die een zeer lineair gedeelte is zijn stroom/spanning-karakteristiek vertoont, zie de onderstaande figuur. Als de gate negatief wordt gemaakt ten opzichte van de source ontstaat er een gebied waar er een volstrekt lineair verband bestaat tussen de gate/source-spanning en de drain-stroom. In dit gebied gedraagt de FET zich als een bestuurbare weerstand, waarvan de weerstand tussen drain en source recht evenredig is met de spanning tussen de gate en de source.
Dankzij deze eigenschap kan de FET worden ingezet om de versterking van een sinusgenerator te stabiliseren. En dank zij dit volstrekt lineaire gedrag is dat zelfs de beste oplossing omdat er nu geen sprake hoeft te zijn van niet-lineaire terugkoppeling en de daarmee samenhangende harmonische vervorming op het uitgangssignaal. In de meeste praktische sinusgeneratoren zult u dan ook een FET als terugkoppel-element aantreffen.
Een zeer eenvoudige voorbeeldschakeling van het FET-principe is getekend rechts in de onderstaande figuur. De FET T1 is opgenomen in de versterkingsfactor bepalende terugkoppeling van de op-amp OP1. Deze terugkoppeling bestaat daarnaast uit de onderdelen R4 en R7. Het probleem bij dergelijke schakelingen is het afleiden van het gate-signaal voor de FET. De gate moet immers met een gelijkspanning gestuurd worden, de generator levert een wisselspanning. In dit voorbeeld wordt dit probleem op de meest eenvoudige manier opgelost. De uitgangsspanning van de sinusgenerator wordt gelijkgericht met behulp van de diode D1. Het gelijkgerichte signaal wordt afgevlakt met de condensator C15. De afgevlakte spanning wordt aangeboden aan een instelpotentiometer R6. De loper gaat naar de gate van de FET. Met behulp van de potentiometer R6 kunt u het meest gunstigste instelpunt van de FET bepalen.
De werking van de schakeling wijkt in wezen niet af van de tot nu toe behandelde systemen. Als de schakeling met de voedingen wordt verbonden zal de spanning over de condensator C15 0 V bedragen. Het gevolg is dat de drain-stroom van de FET vrij hoog is en zijn inwendige weerstand laag. De terugkoppeling bestaat dan uit deze lage weerstand in serie met de eveneens vrij lage R4 en de 5,6 kΩ van de weerstand R7. De schakeling heeft een versterkingsfactor die groter is dan drie en de generator kan oscilleren. De groeiende uitgangsspanning wordt gelijkgericht en bouwt over de condensator C15 een negatieve spanning op. Deze spanning verlegt het instelpunt van de FET in negatieve zin, waardoor de drain-stroom daalt en de FET een hogere weerstand krijgt. De versterking van de schakeling gaat dalen. Als u teveel spanning via R5 toevoert aan de gate van de FET zal de versterking zover dalen dat de oscillatie uitsterft.

Door echter R6 af te regelen kunt u de schakeling instellen op een stabiele sinusvormige uitgangsspanning.



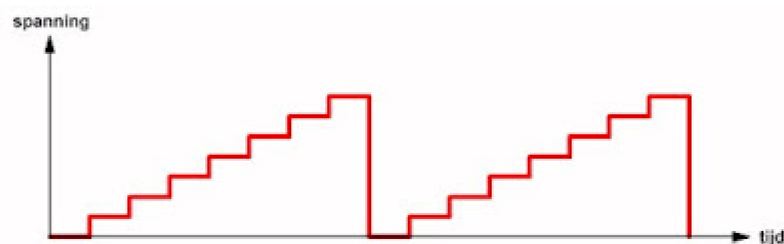
Een FET als AVR in een sinusgenerator. (© 2023 Jos Verstraten)

Let bij dit voorbeeld ook even op de manier waarop u het frequentiebereik kunt instellen. Met de bereikenschakelaar S1a + S1b schakelt u twee identieke condensatoren in de terugkoppeling van de op-amp. Met de stereo-potentiometer R1a + R1b kunt u in ieder bereik de frequentie fijn instellen.
Ook de uitgangskring is een nadere studie waard, omdat u deze voor gelijk welke generator schakeling kunt toepassen. De uitgang van de op-amp gaat naar een weerstandsdeler R9/R10/R11. Als de schakelaar S2 open staat speelt R10 niet mee en kunt u met de potentiometer R11 de uitgangsspanning instellen op de gewenste waarde. Moet u een heel kleine sinusspanning aftakken, dan sluit u de schakelaar S2 waardoor de zeer kleine weerstand R10 parallel over R11 komt te staan en het instelbereik van de uitgangsspanning met een factor tien daalt.

De trapspanning generator

Inleiding

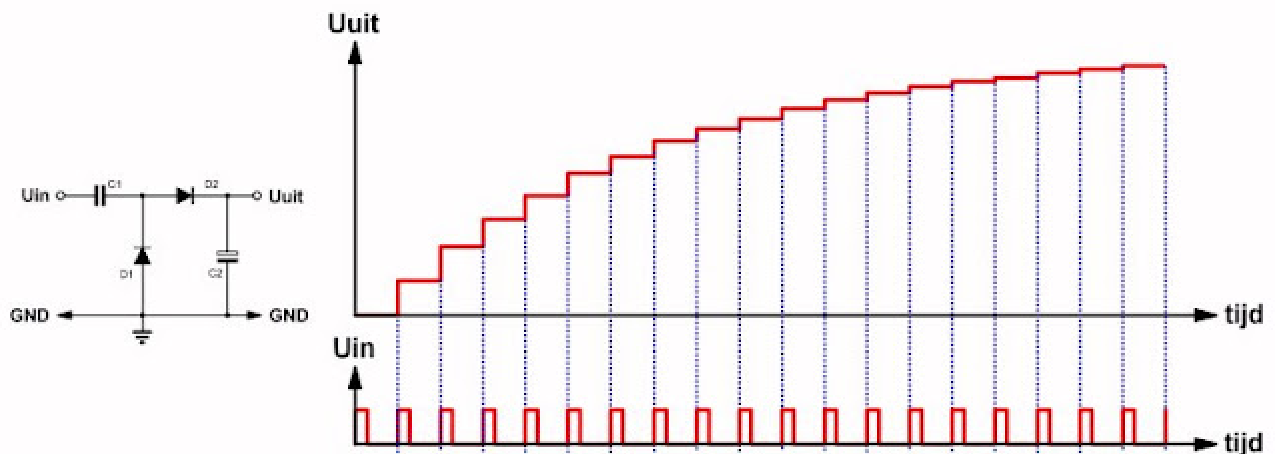
Trapspanningen zijn onmisbaar als u een curve-tracer wilt ontwerpen, waarmee u de stroom/spanning-karakteristieken van een onderdeel op het scherm van een oscilloscoop wilt afbeelden. Het typische verloop van een trapspanning is getekend in de onderstaande figuur. De spanning wordt gekarakteriseerd door het gegeven dat de amplitude op geregelde tijden een bepaalde vaste waarde stijgt of daalt. In het eerste geval hebt u te maken met een positieve trapspanning, in het tweede geval met een negatieve. De grootte van iedere trap en het aantal trappen per periode wordt bepaald door de manier waarop u de generator ontwerpt.



De typische vorm van een trapspanning. (© 2023 Jos Verstraten)

De diodepomp

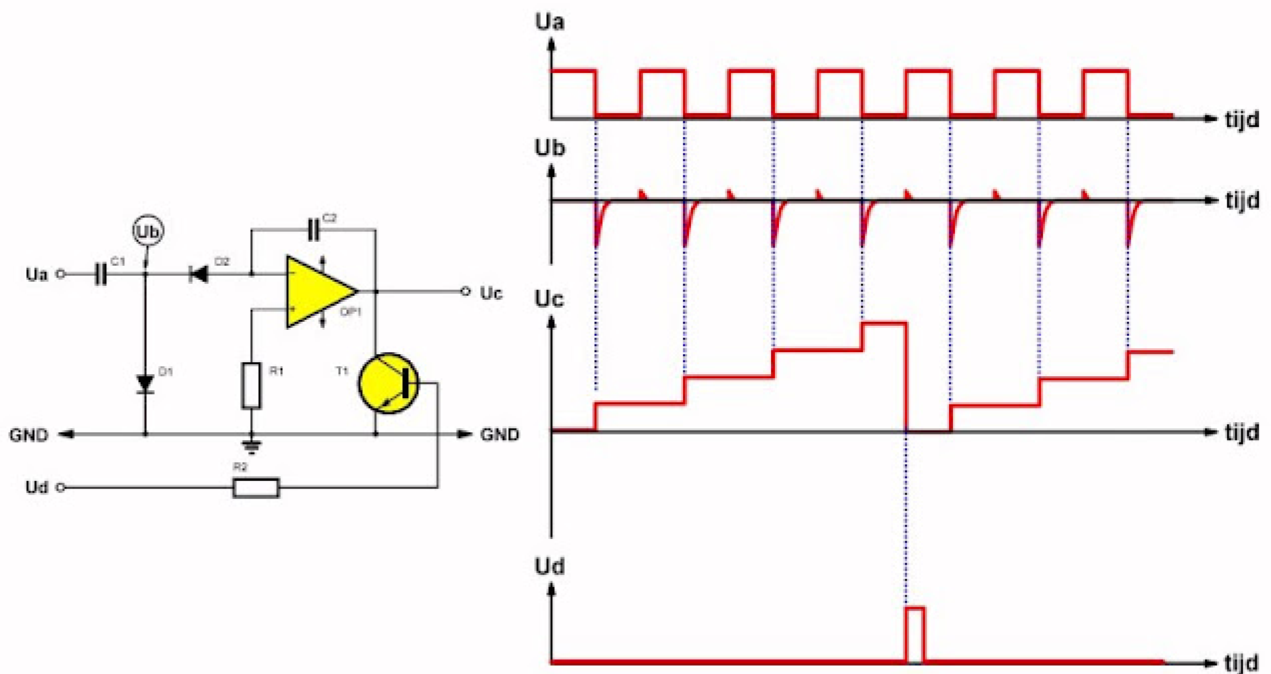
Het fundamentele onderdeel van een trapspanningsgenerator is de diodepomp. Vandaar dat het noodzakelijk is eerst de werking van een dergelijke schakeling te doorgronden. Het theoretisch schema van een diodepomp is getekend in de onderstaande figuur.
De schakeling wordt gestuurd uit een rechthoekspanning generator. De uitgangsspanning van deze generator gaat via de condensator C1 naar de diode D1. Deze twee onderdelen vormen een zogenaamde clampkring, die ervoor zorgt dat de laag naar hoog overgangen in de rechthoekspanning worden omgezet in smalle positieve naaldpulsjes. Deze pulsjes sturen de diode D2 in geleiding. Het gevolg is dat de condensator C2 bij iedere naaldpuls even wordt opgeladen en tussen twee opeenvolgende pulsjes op een constante spanning blijft staan.
Het verband tussen de ingangs- en de uitgangsspanning van deze schakeling is getekend rechts in de figuur.
Uiteraard zal de laadstroom die via de diode D2 naar de condensator C2 vloeit afnemen naarmate de spanning over de condensator groter wordt. Deze stroom is immers afhankelijk van het spanningsverschil over de diode. Aan de linker kant staan steeds dezelfde positieve naaldpulsjes, aan de rechter kant staat de toenemende condensatorspanning. Het zal dus duidelijk zijn dat de opeenvolgende trapjes van de uitgangsspanning niet allemaal even groot zijn, maar langzaam in amplitude afnemen.
De diodepomp wekt dus wel een trapspanning op, maar eentje die voor de meeste toepassingen volstrekt onbruikbaar is. Maar dank zij de introductie van een operationele versterker kunt u dit bezwaar gemakkelijk ondervangen.



De werking van een diodepomp. (© 2023 Jos Verstraten)

De schakeling met op-amp
In de onderstaande figuur is een actieve diodepomp getekend, waarbij het nadeel van de niet-constante trapgrootte wordt ondervangen door het opnemen van een op-amp in de schakeling. De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de grafieken in de figuur.
De condensator C1 vormt samen met de diode D1 de clampkring. Maar nu is de diode omgepoold, met als gevolg dat de rechthoekspanning U_a op de ingang wordt omgezet in negatieve naaldpulsjes U_b. De operationele versterker is geschakeld als integrator. Bij iedere negatieve naaldpuls over de diode D1 gaat de diode D2 even geleiden. De stroom die door de diode vloeit kan alleen afkomstig zijn van de condensator C2. De inverterende ingang van de op-amp heeft immers een zeer hoge weerstand.
De condensator C2 wordt dus bij iedere naaldpuls doorlopen door een stroom en het gevolg is dat de condensator zal opladen. Omdat de niet-inverterende ingang van de op-amp aan de massa ligt zal ook de inverterende ingang op dit potentiaal staan. Het gevolg is dat de uitgang van de op-amp bij iedere naaldpuls met een constante spanning stijgt. De grootte van de stroompulsjes wordt immers bepaald door het spanningsverschil over de diode D2. En in tegenstelling tot de vorige schakeling is dit spanningsverschil nu constant.
Op de uitgang van de operationele versterker ontstaat dus een trapvormige positieve spanning. Uiteraard moet u na een bepaald aantal trapjes het geheel resetten. Dat gebeurt via de transistor T1. Deze wordt in zijn basis gestuurd door een smalle positieve puls U_d.

Deze puls stuurt de transistor in geleiding en de spanning op de rechter plaat van de condensator C2 wordt kortgesloten naar de massa. De uitgangsspanning U_c gaat naar nul en het systeem is klaar voor het genereren van de tweede periode van de trapspanning.



Een actieve diodepomp als trapspanning generator. (© 2023 Jos Verstraten)

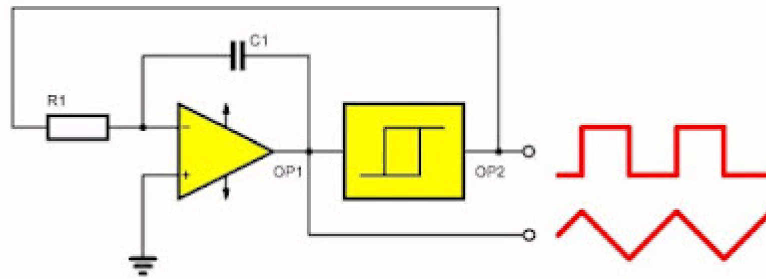
De driehoekspanning generator

Inleiding
Van alle basis spanningsvormen uit de elektronica heeft de driehoek waarschijnlijk de minste praktische toepassingen. Toch hoort de driehoekspanning, dankzij de tegenwoordig overal aanwezige functiegeneratoren, nu tot de standaard signalen van het elektronica-lab.

De basisschakeling
In principe is het erg eenvoudig om een driehoekvormige spanning af te leiden uit een rechthoekvormige spanning. Het volstaat de rechthoek aan te bieden aan een integrator. Als de rechthoekspanning positief is, dan zal de laadstroom die door de integratie condensator loopt ervoor zorgen dat dit onderdeel lineair ontladen wordt. De uitgangsspanning van de schakeling gaat dalen. Is de rechthoekspanning negatief, dan draait de stroom door de condensator om en de integrator levert een stijgende spanning.
Het nadeel van dit systeem is dat de amplitude van de driehoek op de uitgang volledig afhankelijk is van de frequentie van de rechthoek. Dat is zo'n groot bezwaar dat u een dergelijk eenvoudig systeem nooit in de praktijk zult aantreffen.

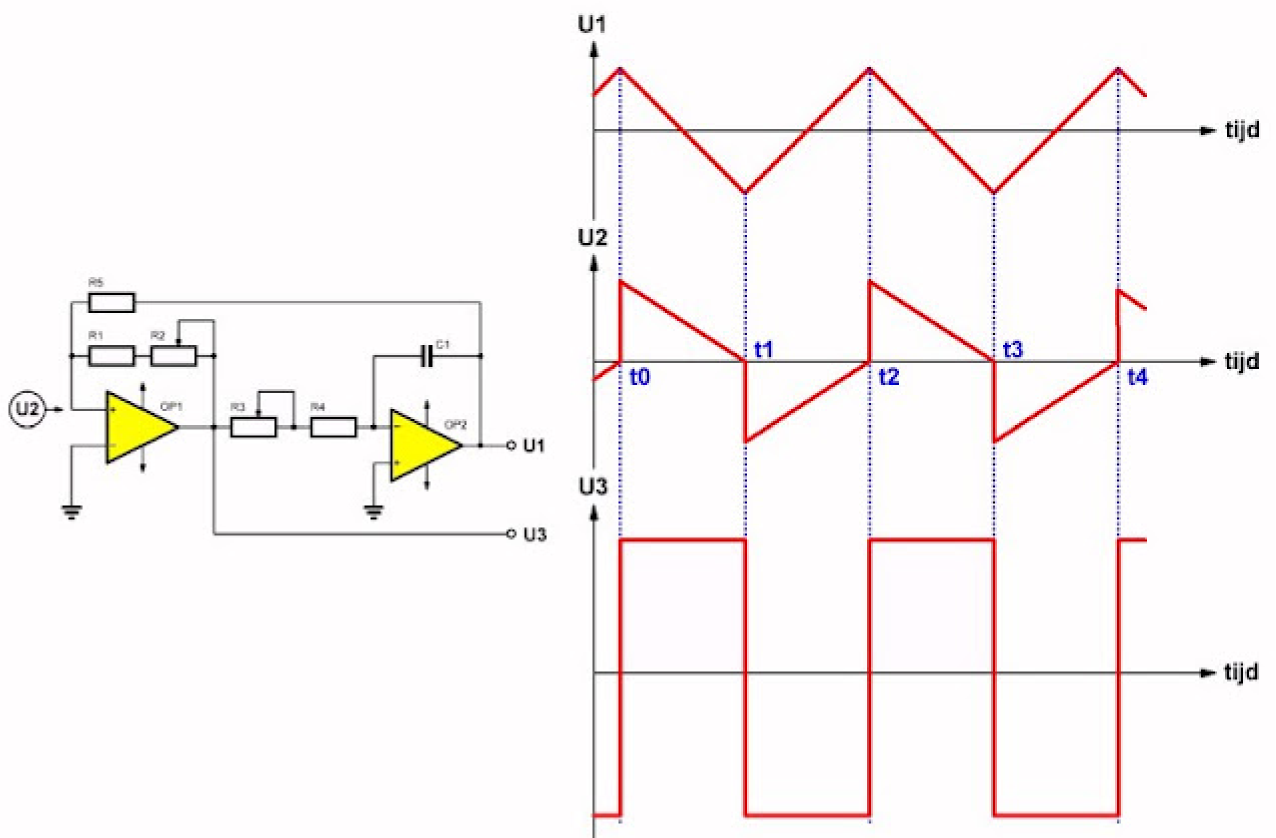
De analoge functiegenerator
Driehoekvormige spanningen worden tegenwoordig altijd gegenereerd in een analoge functiegenerator. Een analoge functiegenerator is een fundamentele schakeling der elektronica die is samengesteld uit twee operationele versterkers, die in een teruggekoppelde lus zijn opgenomen. Het principiële schema van een dergelijke functiegenerator is getekend in de onderstaande figuur. De integrator bestaat uit de linker operationele versterker OP1, de laadweerstand R1 en de integrator condensator C1. De uitgang van deze integrator stuurt een tweede operationele versterker OP2, geschakeld als comparator met hysteresis. Dat wil zeggen dat de schakeling twee gedefinieerde omklappunten heeft. De uitgang van de comparator stuurt op zijn beurt de ingang van de integrator.
Op de uitgang van de integrator ontstaat een driehoek, op de uitgang van de comparator een rechthoek. Beide signalen hebben dezelfde frequentie, die bepaald wordt door de waarden

van de weerstand R1 en de condensator C1.



Het principe van een functiegenerator. (© 2023 Jos Verstraten)

Een praktische schakeling
De werking van de functiegenerator kan het best verklaard worden aan de hand van een praktisch schema. Dat is getekend in de onderstaande figuur. De linker operationele versterker OP1 is de comparator. De inverterende ingang ligt rechtstreeks aan de massa, het zal dus duidelijk zijn dat de uitgangsspanning van de op-amp omklapt als de spanning op de niet-inverterende ingang door de nul gaat.
De niet-inverterende ingang is verbonden met het knooppunt van twee in serie geschakelde weerstanden. De ene tak van deze deler (R5) gaat naar de uitgang van de integrator OP2, de andere tak (R1+R2) gaat naar de uitgang van de comparator. Het zal duidelijk zijn dat de spanning op de niet-inverterende ingang bepaald wordt door de uitgangsspanningen van beide operationele versterkers.
Om de werking van de schakeling te kunnen doorgronden is het noodzakelijk dat u aanneemt dat op moment t_0 de uitgangsspanning van de integrator positief is (stel +5 V) en de uitgang van de comparator ook positief is (stel +10 V). Het zal duidelijk zijn dat de niet-inverterende ingang van de comparator dan ook positief is. De exacte waarde van deze positieve spanning hangt af van de verhouding tussen de weerstanden R5 en R1+R2.
In de grafieken wordt verondersteld dat op het beschreven tijdstip de spanning op de niet-inverterende ingang gelijk is aan +6,7 V. Omdat de niet-inverterende ingang van de comparator positiever is dan de inverterende ingang zal deze schakeling een hoge uitgangsspanning genereren. Een van de veronderstellingen klopt al! De ingang van de integrator wordt gestuurd met een positieve spanning. Er vloeit een stroom door de weerstand R3+R4 naar de inverterende ingang van de integrator. Deze ingang ligt echter virtueel aan de massa, de stroom kan alleen via de integrator condensator C1 afvloeien naar de uitgang van de rechter op-amp. Omdat de op-amp ervoor zorgt dat de linker aansluiting van de condensator op massapotentiaal blijft staan zal de spanning die door de stroom over de integrator condensator wordt opgebouwd op de rechter aansluiting terecht komen. De stroomrichting heeft tot gevolg dat de spanning op dat punt in ieder geval gaat dalen.
Na tijdstip t_0 is de situatie als volgt. Op de uitgang van de comparator staat een constante positieve spanning, op de uitgang van de integrator staat een dalende positieve spanning. Het dalen van deze laatste spanning heeft tot gevolg dat ook de spanning op de niet-inverterende ingang van de comparator gaat dalen.
Op een bepaald moment t_1 zal de spanning op de uitgang van de integrator zo ver gedaald zijn dat de spanning op de niet-inverterende ingang van de comparator 0 V wordt. De comparator klapt om, zijn uitgangsspanning wordt negatief.
Dit verschijnsel heeft verregaande gevolgen op de spanning op de niet-inverterende ingang van de comparator. Dit punt wordt nu immers gevoed uit de twee negatieve uitgangsspanningen, het gevolg is dat de spanning plotseling behoorlijk negatief wordt.
Wat er nadien gebeurt zal duidelijk zijn. De integrator wordt nu gestuurd uit een negatieve spanning, de stroom door de integrator condensator wisselt van polariteit, de uitgangsspanning van de integrator gaat stijgen. Tot op tijdstip t_2, het moment waarop de spanning op de niet-inverterende ingang van de comparator weer door nul gaat en de schakeling weer omklapt.



Een praktische schakeling van een functiegenerator. (© 2023 Jos Verstraten)

Besluit
Een functiegenerator levert synchroon verlopende rechthoek- en driehoekspanningen af, waarvan de frequentie op een wel heel eenvoudige manier is in te stellen door het variëren van de laadstroom van de integrator.